第40卷 第8期
2023年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

双龙沟矸石治理过程中植物群落演替及物种多样性研究

王理德[1,2,3,4]， 宋达成[1,2]， 李广宇[1,3]， 赵赫然[1,2]， 郑克文[5]

(1. 甘肃省治沙研究所，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站，甘肃 武威 733000；3. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站，甘肃 民勤 733300；4. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；5. 天祝藏族自治县哈溪镇畜牧兽医站，甘肃 天祝 733206)

摘 要：为了探讨矸石治理过程中植物群落演替及物种多样性，本文运用时空替代法，选择甘肃省天祝藏族自治县双龙沟矸石治理不同年限(2 a、5 a、10 a)和未治理的矸石作为对照(CK)样地，通过对植被调查，分析研究了植物群落演替特征及物种多样性，并揭示其随着矸石治理年限的增加呈现出的变化规律，为祁连山东段双龙沟及其相似地区矸石治理、生态系统修复及生态环境建设提供科学理论基础。研究表明：(1) 双龙沟矸石治理过程中，4个样地共出现24科40属55种植物，其中有15科是单科、单属及单种，菊科、禾本科、蔷薇科植物种数达到28种，占总科数的12.5%，总物种数达到50.91%。物种构成表现为：多数种属于少数科，大部分植物种为单科、单属。(2) 随着矸石治理年限的增加，群落优势种由一年生或多年生草本植物逐渐转化为多年生草本植物及灌木植物，植物种由对照(CK)的11种，增加到矸石治理5 a时28种，再降到矸石治理10 a的18种，最后垂穗披碱草、早熟禾及沙棘成为该样地的优势种，这三种植物重要值的总和达到48.107。(3) 随着矸石治理年限增加，物种数、Shannon多样性指数、Margalef丰富度指数从CK到矸石治理5 a时逐渐增加，分别达到最大值28、3.506及2.877；Pielou均匀度指数呈现“下降-上升-再下降”的变化趋势，变化幅度不大。Simpson优势度指数呈现出“上升-下降-再上升”变化趋势，矸石治理10 a时达到最大值0.359；(4) 矸石治理年限对植物种群数量特征影响较大，株高从CK、2 a到10 a显著增高($P<0.05$)，盖度从CK到治理5 a、10 a显著增大($P<0.05$)，植物株数从CK到治理10 a显著增大($P<0.05$)。综上所述，祁连山东段双龙沟矸石治理过程中，在人工干预下，矸石治理年限对植被演替及物种多样性影响较大，植物群落逐渐变得单一、稳定。

关键词：双龙沟；矸石治理；植物群落演替；重要值；物种多样性

祁连山是我国西部重要的生态屏障与水源涵养生态功能区，该区域植被类型是高寒生态系统物种多样性最丰富密集的地区之一[1]，其东段的双龙沟曾覆盖大面积的草甸草原和次生灌木，有利于生态系统稳定性和安全性[2]。由于受到大规模的过度开发及其他因素影响，使得河床破损，严重损毁了河道及周边的森林、草原等植被，导致水源涵养林功能下降、生态环境严重破坏、物种多样性急剧减少、生态系统稳定性降低[3]。特别是开矿产生的大量矸石对祁连山生态环境造成了极大的破坏，不但抑制植物生长，而且导致该区土壤污染及水土流失十分严重，受到社会各界的高度关注[4]。如何科学治理因大规模开矿造成的矸石，保护、修复祁连山生态环境，维持植物群落结构稳定性及植物多样性是目前面临的一个新课题。

植被恢复不但直接影响受损生态系统的生物地球化学循环[5]，而且可有效降低土壤容重，改善土壤孔隙状况，增加土壤肥力，改变土壤的空间异质性，从而使土壤的理化性质改善[6]，是矸石生态恢复，改良土壤环境的主要措施之一，现已广泛应用于矸石山土壤质量改良中，成为废弃矿区生态重建领域的重要研究方向[7]。在矿区生态修复过程中，

收稿日期：2023-01-09； **修订日期：**2023-03-29
基金项目：国家自然科学基金(42167069)与甘肃省青年科技基金(20JR10RA468,21JR7RA734)联合资助
作者简介：王理德(1969-)，男，博士，研究员，硕士生导师，主要从事生物多样性及水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: wldzy69@163.net
通讯作者：李广宇. E-mail: 8849950@163.com

曹银贵等[8]研究认为，植被恢复对露天矿区生态系统恢复十分重要；Fernandez 等[9]提出了矿区植被重建关键技术，包括植物物种选择、幼苗种植、群落构建以及植被维护等；Merino-Martin 等[10]考虑到植被生命周期的重要性，提出了全局植被重建技术（植被物种优选、表土覆盖、播种和维护管理）。物种多样性又是衡量一定区域内生物资源丰富程度的一个客观指标，反映了群落内部结构的多样性和空间异质性[11]。可见，植物群落演替及物种多样性研究，对于矸石山生态修复及矿区环境保护具有深远意义。

祁连山地区日照时间长、辐射强、高寒、缺氧等因素共同作用孕育了大量独特的生物资源[12]。关于祁连山植被与土壤物理性质、化学性质、微生物学特性及气候因子、不同地理位置响应的研究较多[13-14]，但涉及到祁连山双龙沟矸石治理过程植物群落演替及物种多样性研究还较少。本研究在祁连山双龙沟选取矸石治理2 a、5 a及10 a的典型植被类型为研究对象，并以没有治理的矸石为对照（CK），采用时空替代的方法对其植物群落演替及物种多样性变化进行了研究，以阐明祁连山双龙沟矸石治理过程中植物群落演替及物种多样性的变化规律，旨在为该区生态系统的修复提供科学理论依据，为双龙沟及其相似地区的受损生态环境修复提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省武威市天祝藏族自治县哈溪镇双龙沟（图1），该区域人为采矿活动频繁，植被和地貌环境破坏严重，水源涵养能力降低，生态服务功能减弱。近10多年来，双龙沟矿区分批次启动一系列治理项目，主要以回填采坑、采槽，整平稳固砂堆，疏导稳固河道，采用种植“沙棘+垂穗披碱草”的人工修复模式，研究区大部分牧民已经搬迁，为矸石治理年限对植物群落演替及物种多样性研究提供了理想的场地。研究区地势南高北低，沟谷纵横，地理坐标为37°18′12″~37°25′18″N，102°17′18″~102°33′42″E，海拔介于2400~4800 m。研究区的西部和南部与青海省接壤，年平均气温3.3 ℃，≥10 ℃的积温 108 ℃，年平均日照时数2547 h，平均无霜期128 d，平均相对湿度58%，年平均蒸发量1677 mm，年均降水量400 mm以上，降水主要集中在8—9月；中晚更新世及全新世初期，受到冰川（融水）及一系列复杂化学反应的影响，在双龙沟流域形成了典型的冰水堆积—阶地型砂金矿床，砂（岩）金、铜、铁、煤炭等矿产资源丰富。双龙沟流域区内有林地2486.1 hm²，疏林地24.4 hm²，灌木林地14857 hm²，草地245 hm²，水域537.5 hm²，雪山裸岩未利用地4445.1 hm²。区内植物资源丰富，以森林和草原为主，乔木以青海云杉（*Picea crassifolia*）为建群种，混交少量祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、红桦（*Betula albo-sinensis*）和山杨（*Populus davidiana*）等，灌木以高山柳(*Salix cupularis*)、杜鹃花（*Rhododendron simsii*）、锦鸡儿（*Caragana sinica*）为主，人工林主要有沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、金露梅（*Potentilla fruticosa*）、银露梅（*Potentilla glabra*）。草本植物以垂穗披碱草（*Elymus nutans*）、蕨麻（*Potentilla anserina*）、多茎委陵菜（*Potentilla multicaulis*）、车前（*Plantago asiatica*）、苔草（*Carex* spp.）、蒲公英（*Taraxacum mongolicum*）为主。

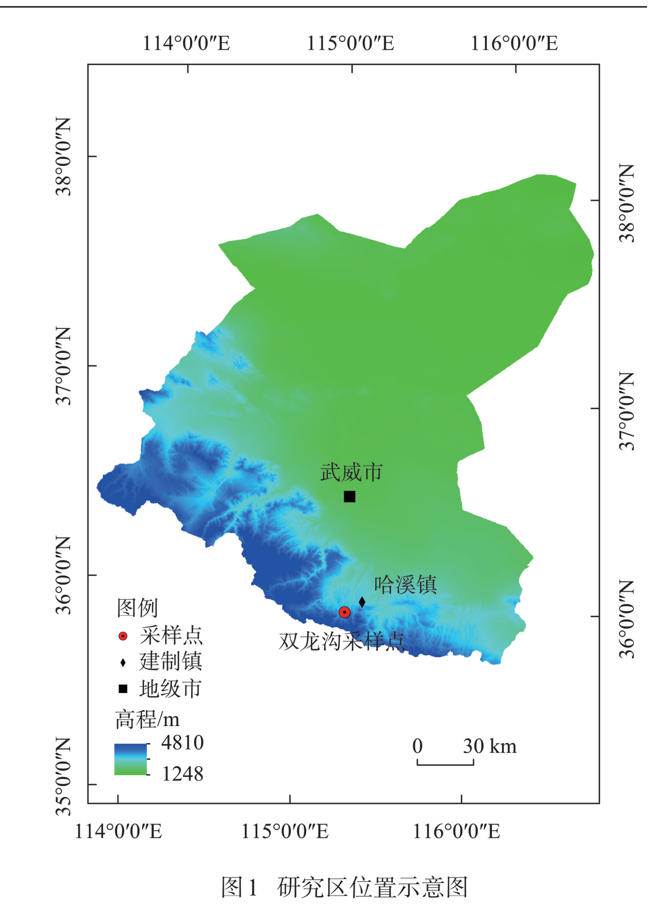


图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location map of the study area

1.2 样地布设及植物调查

2021年7—8月，走访调查当地牧民和查阅天祝县哈溪镇与祁连山国家自然公园哈溪保护站矿区治理相关资料。运用时空替代法，在集中连片的砾石治理区域内，选择自然环境相似、微地形差异较小、植物生长均匀，治理年限分别为2 a、5 a、10 a和没有治理的砾石作为对照(CK)的4个样地。2021年8月25日至9月2日进行野外调查，依据任继周[15]野外调查的方法，在每个样地内设置3块10 m× 10 m大样方，用于测定灌木植物种类、物种数、高度、盖度及冠幅等指标；同时在每个大样方对角设置2块1 m× 1 m小样方，用于测定草本植物种类、物种数、高度和盖度等指标。用GPS定位，测量并详细记录样方中群落优势种、地理坐标、海拔高度(表1)。

1.3 群落特征计算

1.3.1 重要值计算 根据所调查样地内植物群落的特征数据，计算每个样地内各个物种的重要值，并以重要值确定群落主要成分及优势种。计算公式如下[16]：

$$IV = (RHI + RCO + RFE) \times 100\% \quad (1)$$

式中：IV表示重要值；RHI表示相对高度；RCO表示相对盖度；RFE表示相对频度。

相对高度(RHI)=(某种植物的高度/全部植物的总高度)×100%

相对盖度(RCO)=(某种植物的盖度/全部植物的总盖度)×100%

相对频度(RFE)=(某种植物的频度/所有种的总频度)×100%

1.3.2 多样性指数计算 选择Shannon多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数等对祁连山双龙沟不同年限砾石治理植物群落进行测量计算。计算公式如下[16]：

Shannon多样性指数：

$$H = -\sum_{i=1}^{s} P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson优势度指数：

$$C = \sum_{i=1}^{s} \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (3)$$

Pielou均匀度指数：$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

Margalef丰富度指数：$$D_{MG} = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (5)$$

式中：P_i为第i个物种的频度；N_i为第i个物种的个体数；S为物种数量；N为所有物种的总个体数。

1.4 数据处理与分析

试验数据先使用Excel 2013软件进行统计整理，用SPSS 18.0软件进行分析处理，不同治理年限植物种群数量差异显著性采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验。

2 结果与分析

2.1 植物群落物种组成

由表2可以看出，在双龙沟砾石治理过程中，调查的4个样地(2 a、5 a、10 a和CK)内共出现24科40属55种植物，其中菊科(8属11种)、禾本科(4属6种)、蔷薇科(3属11种)植物，占总科数的12.5%，占总物种数的50.91%(分别为20%、10.91%和20%)；

表1 不同治理年限样地基本特征

Tab. 1 Different administrative fixed number of year sample ground basic characteristic

编号	治理年限/a	海拔/m	纬度	经度	群落优势种
0a-1	0	3113	37°22′13″N	102°22′53″E	臭蒿(*Artemisia hedinii*)、还阳参(*Crepis rigescens*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)
0a-2	0	3050	37°22′17″N	102°23′6″E	
0a-3	0	3052	37°22′14″N	102°23′7″E	
2a-1	2	3048	37°22′16″N	102°23′9″E	垂穗披碱草、蕨麻(*Potentilla anserina*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)
2a-2	2	3048	37°22′16″N	102°23′9″E	
2a-3	2	3048	37°22′16″N	102°23′9″E	
5a-1	5	3003	37°22′6″N	102°23′45″E	银露梅(*Potentilla glabra*)、沙棘、西北沼委陵菜(*Comarum salesovianum*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)
5a-2	5	2966	37°22′7″N	102°23′47″E	
5a-3	5	2663	37°23′49″N	102°29′12″E	
10a-1	10	2959	37°22′18″N	102°23′55″E	早熟禾(*Poa annua*)、沙棘、垂穗披碱草、西北沼委陵菜
10a-2	10	2868	37°22′26″N	102°25′23″E	
10a-3	10	2652	37°23′49″N	102°29′15″E	

表2　祁连山双龙沟植物群落物种组成

Tab. 2　Species composition of vegetation community in Shuanglonggou, Qilian Mountains

编号	科	属数	物种数
1	菊科(Asteraceae)	8	11
2	禾本科(Poaceae)	4	6
3	蔷薇科(Rosaceae)	3	11
4	毛茛科(Ranunculaceae)	2	2
5	石竹科(Caryophyllaceae)	2	2
6	报春花科(Primulaceae)	1	1
7	苋科(Amaranthaceae)	1	1
8	车前科(Plantaginaceae)	1	1
9	通泉草科(Mazaceae)	1	1
10	十字花科(Brassicaceae)	1	1
11	白花丹科(Plumbaginaceae)	1	1
12	唇形科(Lamiaceae)	1	1
13	莎草科(Cyperaceae)	1	1
14	龙胆科(Gentianaceae)	2	2
15	罂粟科(Papaveraceae)	2	2
16	蓼科(Polygonaceae)	1	2
17	柳叶菜科(Onagraceae)	1	1
18	茜草科(Rubiaceae)	1	1
19	列当科(Orobanchaceae)	1	1
20	牻牛儿苗科(Geraniaceae)	1	1
21	鸢尾科(Iridaceae)	1	1
22	胡颓子科(Elaeagnaceae)	1	2
23	杨柳科(Salicaceae)	1	1
24	忍冬科(Caprifoliaceae)	1	1
合计		40	55

毛茛科、石竹科、龙胆科、罂粟科分别为2属2种，4科共占总物种数的14.55%；蓼科、胡颓子科为1属2种，共占总物种数的7.27%。其余15科均是1属1种，即为单科、单属及单种，占总物种数的27.27%。

2.2　矸石治理年限对植物群落物种重要值的影响

不同年限矸石治理过程中植物群落调查总共发现55种植物(表3)，其中草本46种占总物种数的83.64%、灌木8种占总物种数的14.55%、藤本1种占总物种数的1.82%。矸石在没有进行人工治理(CK)时，实验样地共有植物11种，其中草本植物9种，灌木植物2种。臭蒿(*Artemisia hedinii*)、还阳参(*Crepis rigescens*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、垂穗披碱草、风毛菊(*Saussurea japonica*)等5种草本植物重要值较大，分别是14.763、13.912、13.372、13.361、10.841。两种灌木悬钩子(*Rubus corchorifolius*)及银露梅重要值较小，分别是7.102及3.5。

矸石治理2 a后，植物种类成倍增加，草本植物增加了9种，灌木植物增加了3种。天山千里光(*Senecio thianschanicus*)、蕨麻、多茎委陵菜、鼬瓣花(*Galeopsis bifida*)、车前等大量草本植物出现，使草本植物的种类达到了18种，但是草本植物风毛菊、还阳参、高原毛茛的重要值明显下降为2.180、2.144、1.732，分别下降了4.973倍、6.489倍及7.72倍；臭蒿、西藏点地梅(*Androsace mariae*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、小果滨藜(*Microgynoecium tibeticum*)4种草本植物的重要值由14.763、7.771、4.763、6.579变为0，矸石治理后，再没有出现。而灌木植物由原来的2种增加到5种，并且沙棘的重要值高达9.028。

矸石治理5 a后，治理2 a样地内的优势草本植物种垂穗披碱草、蕨麻及披碱草等草本植物的重要值下降了4.403倍、6.324倍及11.214倍，并且CK中出现的草本植物除垂穗披碱草外，全部退出。但是，草本植物苔草、蒲公英、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)等大量草本植物出现，使草本植物的种类达到了23种。灌木植物中小叶柳(*Salix hypoleuca*)退出，肋果沙棘(*Hippophae neurocarpa*)出现，在矸石治理5 a的样地中出现了28种植物，银露梅的重要值达到最大，为11.501、沙棘的重要值(10.303)次之、西北沼委陵菜(*Comarum salesovianum*)的重要值也增加了120.4%。

矸石治理10 a后，植物群落中草本植物种数量由23种减少为13种，并且大部分是新出现的物种，原来CK、治理2 a、治理5 a三个样地内留存的草本植物只有5种；群落中首次出现了藤本植物甘青铁线莲(*Clematis tangutica*)，其重要值高达8.242。灌木植物忍冬(*Lonicera japonica*)首次出现，但其重要值只有3.361，金露梅及肋果沙棘消失，灌木植物也由5种减少为4种。

2.3　矸石治理年限对植物群落物种多样性的影响

由表4可知，在矸石治理10 a的植物群落演替过程中，物种数与Shannon多样性指数、Margalef丰富度指数从CK到矸石治理5 a时逐渐增加，在矸石治理5 a时分别达到最大值28、3.506、2.877，到第10 a时有所下降，物种数与Margalef丰富度指数的最小值出现在CK样地内，分别是11与1.417，Shannon多样性指数的最小值(2.039)出现在治理10 a样地内，

表3 矸石治理年限对植物群落物种重要值的影响

Tab. 3 Effects of treatment years of gangue on species importance value of vegetation community

编号	物 种	植物生活型	修复年限			
			CK	2 a	5 a	10 a
1	臭蒿 *Artemisia hedinii*	草本	14.763	0	0	0
2	垂穗披碱草 *Elymus nutans*	草本	13.361	18.548	4.212	11.789
3	风毛菊 *Saussurea japonica*	草本	10.841	2.180		
4	高原毛莨 *Ranunculus tanguticus*	草本	13.372	1.732		
5	还阳参 *Crepis rigescens*	草本	13.912	2.144		
6	山卷耳 *Cerastium pusillum*	草本	7.036	2.433		
7	委陵菜 *Potentilla chinensis*	草本	4.763			
8	西藏点地梅 *Androsace mariae*	草本	4.771			
9	小果滨藜 *Microgynoecium tibeticum*	草本	6.579			
10	糙叶蝇子草 *Silene trachyphylla*	草本	0	1.609		
11	车前 *Plantago asiatica*	草本	0	2.977	3.955	
12	多茎委陵菜 *Potentilla multicaulis*	草本	0	3.800	5.794	
13	蕨麻 *Potentilla anserina*	草本	0	10.921	1.727	1.535
14	甘肃蒿 *Artemisia gansuensis*	草本	0	5.822		
15	蒙古蒿 *Artemisia mongolica*	草本	0	2.179		5.103
16	披碱草 *Elymus dahuricus*	草本	0	7.998	0.713	
17	肉果草 *Lancea tibetica*	草本	0	2.599		
18	涩荠 *Malcolmia africana*	草本	0	1.829		
19	天山千里光 *Senecio thianschanicus*	草本	0	4.143	3.253	
20	驼舌草 *Goniolimon speciosum*	草本	0	2.710		
21	鼬瓣花 *Galeopsis bifida*	草本	0	2.865		1.993
22	早熟禾 *Poa annua*	草本	0	2.612	2.066	19.155
23	矮火绒草 *Leontopodium nanum*	草本	0		4.140	
24	丛生钉柱委陵菜 *Potentilla saundersiana* var. *caespitosa*	草本	0		2.390	
25	钉柱委陵菜 *Potentilla saundersiana*	草本	0		1.946	
26	短花针茅 *Stipa breviflora*	草本	0		0.980	
27	佛子茅 *Calamagrostis epigeios*	草本	0		1.853	
28	火绒草 *Leontopodium leontopodioides*	草本	0		6.999	
29	蒲公英 *Taraxacum mongolicum*	草本	0		2.311	
30	苔草 *Carex* spp.	草本	0		4.599	
31	椭圆叶花锚 *Halenia elliptica*	草本	0		0.975	
32	细果角茴香 *Hypecoum leptocarpum*	草本	0		2.880	
33	细叶亚菊 *Ajania tenuifolia*	草本	0		2.226	
34	圆穗蓼 *Polygonum macrophyllum*	草本	0		1.127	
35	圆柱披碱草 *Elymus dahuricus* var. *cylindricus*	草本	0		1.880	
36	狭叶委陵菜 *Potentilla stenophylla*	草本	0		0.777	
37	沼生柳叶菜 *Epilobium palustre*	草本	0		1.537	
38	珠芽蓼 *Polygonum viviparum*	草本	0		3.311	
39	北方拉拉藤 *Galium boreale*	草本	0			2.303
40	短腺小米草 *Euphrasia regelii*	草本	0			2.561
41	二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*	草本	0			1.357
42	甘青铁线莲 *Clematis tangutica*	藤本	0			8.242
43	灰绿黄堇 *Corydalis adunca*	草本	0			2.728
44	老鹳草 *Geranium wilfordii*	草本	0			1.409
45	马莲 *Iris lactea*	草本	0			2.715
46	秦艽 *Gentiana macrophµlla*	草本	0			2.176
47	乳白香青 *Anaphalis lactea*	草本	0			2.267
48	悬钩子 *Rubus corchorifolius*	灌木	7.102			
49	银露梅 *Potentilla glabra*	灌木	3.5	3.898	11.501	6.412
50	金露梅 *Potentilla fruticosa*	灌木	0	2.791	6.849	
51	沙棘 *Hippophae rhamnoides*	灌木	0	9.028	10.303	17.163
52	小叶柳 *Salix hypoleuca*	灌木	0	1.945		
53	西北沼委陵菜 *Comarum salesovianum*	灌木	0	3.236	7.131	7.730
54	肋果沙棘(小) *Hippophae neurocarpa*	灌木	0		2.565	
55	忍冬 *Lonicera japonica*	灌木	0			3.361

表4 物种多样性随矸石治理年限的变化

Tab. 4 Changes of species diversity with years of gangue treatment

治理年限	物种数(S)	Shannon(H)	Pielou(E)	Simpson(C)	Margalef(D_{MG})
CK	11	2.266	0.655	0.284	1.417
2 a	23	2.280	0.504	0.325	2.438
5 a	28	3.506	0.729	0.159	2.877
10 a	18	2.039	0.489	0.359	1.734

整体变化幅度较小；Pielou均匀度指数呈现出先下降(CK~2 a)后上升(2 a~5 a)再下降(5 a~10 a)的变化趋势，随着矸石治理年限的增加，变化规律不明显。Simpson优势度指数呈现上升(CK~2 a)下降(2 a~5 a)再上升(5 a~10 a)的变化趋势，第10 a达到最大值0.359。

2.4 矸石治理年限对植物种群数量特征的影响

由表5可以看出，矸石治理年限对植物种群数量特征影响较大，随着治理年限的增加，株高、盖度及植物株数均呈现出逐渐增加的趋势。株高从CK、2 a到10 a显著增高($P<0.05$)，治理5 a比2 a增高了7.628 cm，但差异不显著；盖度从CK到治理5 a、10 a显著增大($P<0.05$)，矸石从治理2 a(36.305%)到5 a(52.710%)有所增加，但差异不显著；植物株数从CK到治理10 a显著增大($P<0.05$)，治理2 a与5 a有所增加，但植物株数在227株与276株之间，差异不显著。

3 讨 论

掠夺式的采矿活动对生态环境造成的破坏超过了自然生态系统恢复力承受的上限，必须通过人工干预才能使废弃矿区生态系统快速修复[17]。祁连山双龙沟经历16 a(1982—1997年)疯狂掠夺式采金活动之后，使得20 km多的河床上，槽穴纵横，砂石堆遍布，植被严重毁坏，水土流失加剧，对生态环境造成极大破坏，同时对生态安全构成严重威胁[18]。前人研究认为，植被自然演替过程比较缓慢，辅助施加人工复垦措施，更有利于生态系统稳定性及野生植被的恢复，提高植被演替的速率并缩短其周期[19]。在人工植被引入后，提高了双龙沟废弃矿区植被多样性，促进了植物群落的构建[2]，从祁连山双龙沟不同样地植物群落物种组成综合分析来看(表2)，在双龙沟矸石地治理0~10 a的植被演替过程中，4个样地内共出现24科40属55种植物，其中菊科、禾本科及蔷薇科3科植物占总物种数的50.91%，比例比较大；报春花科(Primulaceae)、苋科(Amaranthaceae)、车前科(Plantaginaceae)、通泉草科(Mazaceae)、十字花科(Brassicaceae)、白花丹科(Plumbaginaceae)、唇形科(Lamiaceae)、莎草科(Cyperaceae)、柳叶菜科(Onagraceae)、茜草科(Rubiaceae)、列当科(Orobanchaceae)、牻牛儿苗科(Geraniaceae)、鸢尾科(Iridaceae)、杨柳科(Salicaceae)、忍冬科(Caprifoliaceae)等15科都是1属1种，也就是单科、单属及单种，占总科数的62.5%。说明菊科、禾本科及蔷薇科这3科植物在矸石治理的植被演替中起着重要的作用，而且物种构成表现为"多数种属于少数科、少数种属于多数科"，大部分植物种为单科、单属。植物群落物种组成和常丽等[2]对双龙沟废弃采金区人工栽植沙棘后植物群落组成研究相一致，也与王佳等[16]对青土湖退耕地植物群落演替规律研究相似。这表明在不同地理位置、不同生存环境中，植被在群落演替过程中需要对生存环境做出一系列有利于生存的响应调节[5]，但又不失去物种构成中"多数种属于少数科、少数种属于多数科，大部分植物种为单科、单

表5 不同治理年限植物种群数量特征

Tab. 5 Quantitative characteristics of plant population in different treatment years

样地	株高/cm	盖度/%	植物株数/(株·m^{-2})
CK	3.170±0.208a	22.551±2.328a	157.037±13.838a
2	15.595±1.004b	36.305±2.448ab	227.502±17.027ab
5	23.223±3.776b	52.710±5.068b	276.704±85.779ab
10	100.585±12.030c	89.562±2.176c	425.061±36.571b

注：不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

属”的共性。

重要值是在计算、评估物种多样性时的重要指标,以综合数值表示植物物种在群落中的相对重要性,而群落结构是植物群落的基本属性,也是认识群落的组成、变化和发展趋势的基础[20]。从不同样地植物群落物种组成及重要值综合分析来看,不同年限矸石治理过程中植物群落调查表明(表3),CK样地内臭蒿、还阳参、高原毛茛、垂穗披碱草、风毛菊等5种草本重要值较大,分别为14.763、13.912、13.372、13.361、10.841,可见样地内植物群落的优势种为一年生草本或者多年生草本;治理2 a样地内,植被优势种变为草本植物垂穗披碱草、蕨麻、披碱草及灌木植物沙棘(垂穗披碱草及沙棘为人工种植),其重要值分别为18.548、10.921、7.998及9.028,可见,治理2 a样地内人工种植的物种逐渐占优势;在矸石治理5 a的样地中灌木植物银露梅、沙棘、西北沼委陵菜及火绒草的重要值较大,分别为11.501、10.303、6.849及6.999,表明灌木植物首次占有绝对的优势种;治理10 a样地内草本植物种早熟禾、垂穗披碱草及灌木植物沙棘的重要值显著增大,分别为19.155、11.789及17.163,成为植物群落的优势种,这说明人工栽植的灌木植物对祁连山矸石治理具有较大的促进作用。同时看出,矸石治理5 a后,对照样地中出现的草本植物除垂穗披碱草外,全部退出;治理2 a、5 a样地内的草本植物,在治理10 a的样地内大部分消失。可见,在矸石治理10 a的植物群落演替过程中,草本植物种更替比较频繁,相对而言群落内灌木植物的数量及种类比较稳定,主要灌木植物沙棘与西北沼委陵菜的重要值逐渐增大,群落优势种由一年生草本及多年生草本植物逐渐转化成多年生草本植物及灌木植物,多年生草本植物垂穗披碱草、早熟禾及灌木植物沙棘成为群落优势种。另外,草本植物垂穗披碱草及灌木植物银露梅在4个样地内都存在,说明在双龙沟矸石治理过程中,植物群落的演替具有一定的延续性,符合植物群落演替的总体特征,这种结构和曹银贵等[8]、王理德等[21]对露天矿区及退耕地生态修复植物群落研究相一致。这说明无论是矿区的矸石治理,还是退耕地生态修复,群落优势种都是由一年生草本及多年生草本植物逐渐转化成多年生草本植物及灌木植物,同时植物群落的演替具有一定的延续性。

植物群落物种多样性是反映植物群落结构和功能复杂性的量化指标,研究植物群落物种多样性,更有利于了解生态系统稳定性及植物群落发展阶段及物种空间分布规律[22]。双龙沟在矸石治理10 a的植物群落演替过程中,Simpson优势度指数呈现出先上升(CK~2 a)后下降(2 a~5 a)再上升(5 a~10 a)的变化趋势,在第10 a达到最大值0.359。Simpson优势度指数的变化表明,植物群落物种在自然演替过程中向着简单、稳定的方向逐渐发展。矸石治理过程中优势种逐渐由一年生草本植物及多年生草本向多年生草本与灌木演替,这一结论与李永强等[23]研究典型草原区撂荒地的结果不同。Pielou均匀度指数随着矸石治理年限的增加,呈现出先下降(CK~2 a)后上升(2 a~5 a)再下降(5 a~10 a)的变化趋势,王理德等[21]对退耕地植被自然演替研究结果表明,Pielou均匀度指数随着退耕年限的增加,呈现出先上升(1 a~4 a)后下降(4 a~13 a)再上升(13 a~40 a)的变化趋势,两者正好相反。以上三者的差异可能是由于不同环境条件所导致的,本试验区为高寒山区矸石地,李永强等[23]与王理德等[21]的研究区分别为半干旱典型草原区撂荒地及干旱绿洲边缘退耕地,这可能是由于研究区水文、土壤、地形、气候等不同,而导致的研究结果不同;Shannon多样性指数、Margalef丰富度指数与物种数,从CK到矸石治理5 a时逐渐增加,在矸石治理5 a时,分别达到最大值3.506、2.877与28,这说明在矸石治理初期时,由于人工的干预(覆土、施肥等),不同程度的增加了土壤的肥力,同时乔木植物对阳光的遮挡较少,使得植被的生长空间和生长资源相对充足,草本植物生长没有受到限制,提高了Shannon多样性指数、Margalef丰富度指数,增加了群落内物种的种类。矸石治理10 a时,植被生长所需要的营养物质及条件达到了土地承载上限,优势种沙棘生长旺盛,高度与盖度显著增大(表5),光照严重不足,抑制了其他植物的生长,特别是草本植物光合作用减弱,因此开始出现竞争,部分植被没有足够的生长空间和生长资源被淘汰,使得Shannon多样性指数、Margalef丰富度指数下降,物种数减少并趋于简单、稳定。这与何洪盛等[24]研究的青土湖退耕地自然恢复植物群落多样性分析研究结果相似。这说明在祁连山矸石治理过种中植物群落物种多样性与退耕地植被自然演替有明显差异,也有相似之处,在相关研究中要区别分析。

植物种群数量特征是生态学针对植物研究的重点内容之一，它能反映植物种群数量多寡及时空变化规律[25]。本研究结果表明，祁连山双龙沟植被修复过程中，随着治理年限的增加，株高、盖度及植物株数均呈现出逐渐显著增加趋势（$P<0.05$），特别是株高由CK的3.17 cm，生长到10 a的100.585 cm，增加了68.8倍。可见，在人工干预作用下（人工种植"沙棘+垂穗披碱草"），祁连山双龙沟生态修复较自然修复具有显著的差异。刘莹等[26]对乌海废弃矿区修复过程中植被演替及物种多样性进行了研究，结果表明人工种植沙打旺、紫花苜蓿、大狗尾草对废弃矿区修复有很大的促进作用。这表明人工辅助干预，可以有效的促进矿区生态修复，改善生态环境。

综上所述，通过人工干预重建废弃矿区生态环境，是治理矸石十分必要的。植被恢复过程的实质就是植被与土壤环境相互依存互为促进的过程[27]，本研究反应出了矸石治理年限对植物群落的演替及物种多样性有着显著的影响，据相关研究表明土壤物理性质、化学性质、土壤酶活性及土壤微生物与二者也具有显著的相关性[28-29]。所以，后续工作还要进行植物与土壤因子的相关性研究。

4 结 论

在双龙沟矸石治理过程中，4个样地中共出现24科40属55种植物，菊科、禾本科、蔷薇科植物，占总物种数的50.91%，其中15科是单科、单属及单种；随着矸石治理年限的增加，群落优势种由一年生草本或者多年生草本逐渐演化成多年生草本或者灌木植物；物种数、Shannon多样性指数与Margalef丰富度指数从CK到矸石治理5 a时逐渐增加，然后呈下降趋势；Pielou均匀度指数呈现出"下降-上升-再下降"的变化趋势；Simpson优势度指数呈现出"上升-下降-再上升"的变化趋势，在矸石治理10 a时达到最大值，其余各指标的最大值均在矸石治理5 a时出现。总之，矸石治理年限对植物种群数量特征影响较大，随着治理年限的增加，株高、盖度及植物株数均呈现出逐渐增加的趋势。

参考文献（References）：

[1] 楚彬, 马素洁, 周延山, 等. 祁连山东段高原鼢鼠(*Eospalax baileyi*)土丘空间分布格局及其与环境因子的空间关联性[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 964–974. [Chu Bin, Ma Sujie, Zhou Yanshan, et al. Relationship between the spatial distribution of the mounds of plateau zokor (*Eospalax baileyi*) and environmental factors in eastern Qilian Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 964–974.]

[2] 常丽, 吴春荣, 何芳兰, 等. 双龙沟废弃采金区人工栽植沙棘后植物群落组成和土壤性质的变化研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(19): 83–90. [Chang Li, Wu Chunrong, He Fenlan, et al. Artificial planting of *Hippophae rhamnoides* in abandoned goldfield of Shuanglong Gully: Effects on community composition and soil properties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35 (19): 83–90.]

[3] 赵雅丽, 富新年, 卓玉璞, 等. 天祝县已垦草原植被恢复试验研究[J]. 中国草食动物科学, 2019, 39(5): 69–71. [Zhao Yali, Fu Xinnian, Zhuo Yupu, et al. Experimental study on vegetation restoration of reclaimed steppe in Tianzhu County[J]. Chinese Journal of Herbivore Science, 2019, 39(5): 69–71.]

[4] 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展：从生态治理到生态恢复[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2928–2937. [Li Xin, Gou Xiaohua, Wang Ninglian, et al. Green development in Qilian Mountains: from ecological governance to ecological restoration[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2928–2937.]

[5] 马雄忠. 阿拉善高原典型荒漠灌木根系适应性特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. [Ma Xiongzhong. Root Adaptabilities of Typical Desert Shrubs in Alxa Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.]

[6] Huang L, Zhang P, Hu Y, et al. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine[J]. Global Ecology & Conservation, 2015, 4: 255–263.

[7] 刘阳, 刘畅, 邢兆凯, 等. 矸石山不同造林模式对土壤养分及酶活性影响的研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1418–1422. [Liu Yang, Liu Chang, Xing Zhaokai, et al. Study on soil nutrition and enzyme activity under different afforestation models in coal waste pile[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(8): 1418–1422.]

[8] 曹银贵, 白中科, 张耿杰, 等. 山西平朔露天矿区复垦农用地表层土壤质量差异对比[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2422–2428. [Cao Yingui, Bai Zhongke, Zhang Gengjie, et al. Soil quality of surface reclaimed farmland in large open-cast mining area of Shanxi Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12): 2422–2428.]

[9] Fernandez M E, Passera C B, Cony M A. Sapling growth, water status and survival of two natives hrubs from the Monte Desert, *Mendoza, Argentina*, under different preconditioning treatments[J]. Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias, 2015, 48(1): 33–47.

[10] Merino-Martin L, Commander L, Mao Z, et al. Overcoming topsoil deficits in restoration of semiarid lands: Designing hydrologically favourable soil covers for seedling emergence[J]. Ecological Engi-

neering, 2017, 105: 102-117.

[11] 王敏, 周润惠, 余飞燕, 等. 不同林龄桉树人工林林下物种多样性和生物量的动态变化[J]. 植物研究, 2021, 41(4): 496-505. [Wang Min, Zhou Runhui, Yu Feiyan, et al. Dynamic changes of undergrowth species diversity and biomass of *Eucalyptus robusta* plantations at different ages[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(4): 496-505.]

[12] 褚海燕. 高寒生态系统微生物群落研究进展[J]. 微生物学通报, 2013, 40(1): 123- 136. [Chu Haiyan. Microbial communities in high latitudes and high altitudes ecosystems[J]. Microbiology China, 2013, 40(1): 123-136.]

[13] 王迪, 赵锦梅, 雷隆举, 等. 祁连山东段高寒植被类型对土壤理化特征的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 35-40. [Wang Di, Zhao Jinmei, Lei Longju, et al. Soil physical and chemical properties of different alpine plants in eastern Qilian Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 35-40.]

[14] 张宏斌, 吕东, 赵明, 等. 基于全基因组SNP分子标记分析青海云杉遗传结构[J]. 植物研究, 2022, 42(3): 373-382. [Zhang Hongbin, Lv Dong, Zhao Ming, et al. Genetic structure analysis of *Picea crassifolia* based on genome-wide SNP molecular markers[J]. Bulletin of Botanical Research, 2022, 42(3): 373-382.]

[15] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 122-136. [Ren Jizhou. Methods of Scientific Research in the Grass Industry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 122-136.]

[16] 王佳, 田青, 王理德, 等. 青土湖不同年限退耕地植被物种多样性及土壤酶活性研究[J]. 西北植物学报, 2021, 41(11): 1900-1911. [Wang Jia, Tian Qing, Wang Lide, et al. Study on vegetation succession and soil enzyme activities of abandoned land in different years in Qingtu Lake[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(11): 1900-1911.]

[17] 侯静. 胜利矿区土地退化时空特征与生态修复效果研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2021. [Hou Jing. Study on Spatiotemporal Characteristics of Land Degradation and Ecological Restoration Effect in Shengli Mining Area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.]

[18] 周怀清. 武威地区彻底整治双龙沟采金区[J]. 中国水土保持, 1999(4): 33-34. [Zhou Huaiqing. Complete regulation of Shuanglonggou gold mining area in Wuwei Area[J]. Soil and Water Conservation in China, 1999(4): 33-34.]

[19] Kamala H, Sunanda S, Chumkijini C. Secondary succession in abandoned agricultural lands of Western Odisha, India[J]. Journal of Biodiversity and Environmental Science, 2016, 8(1): 75-85.

[20] 袁蕾, 周华荣, 宗召磊, 等. 乌鲁木齐地区典型灌木群落结构特征及其多样性研究[J]. 西北植物学报, 2014, 34(3): 595-603. [Yuan Lei, Zhou Huarong, Zong Zhaolei, et al. Structural characteristics and diversity of typical shrub plant community in the Urumqi region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(3): 595-603.]

[21] 王理德, 田青, 郭春秀, 等. 不同退耕年限干旱绿洲植被群落及灰棕漠土特性变化[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1436-1447. [Wang Lide, Tian Qing, Guo Chunxiu, et al. Variation of oasis vegetation communities and properties of grey brown desert soil relative to history of "Grain for Green" in arid regions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1436-1447.]

[22] 孙一梅, 田青, 吕朋, 等. 极端干旱与氮添加对半干旱沙质草地物种多样性、叶性状和生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1569-1579. [Sun Yimei, Tian Qing, Lv Peng, et al. Effects of extreme drought and nitrogen addition on species diversity, leaf trait, and productivity in a semiarid sandy grassland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1569-1579.]

[23] 李永强, 许志信. 典型草原区撂荒地植物群落演替过程中物种多样性变化[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 26-31. [Li Yongqiang, Xu Zhixin. Changes of species diversity in successional of plant community of abandoned land in typical steppe[J]. Journal of Inner Mongola Institute of Agriculture and Animal Husbandry, 2002, 23(4): 26-31.]

[24] 何洪盛, 田青, 王理德, 等. 青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 223-232. [He Hongsheng, Tian Qing, Wang Lide, et al. Study on vegetation community characteristics and soil physical and chemical properties of abandoned land in Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 223-232.]

[25] 赵阳, 曹秀文, 李波, 等. 甘肃南部林区4种天然林种群结构特征[J]. 林业科学, 2020, 56(9): 21-29. [Zhao Yang, Cao Xiuwen, Li Bo, et al. Structural characteristics of 4 natural populations in the southern forest region of Gansu Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(9): 21-29.]

[26] 刘莹, 许丽, 丰菲, 等. 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性[J].水土保持通报, 2021, 41(1): 190- 196. [Liu Ying, Xu Li, Feng Fei, et al. Species diversity and community stability at early stage of vegetation reclamation in gangue hill slope of Wuhai Mining Area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 190-196.]

[27] 黄金, 王慧娟, 汪江萍, 等. 废弃矿区生态修复技术分析[J]. 世界有色金属, 2019(10): 235-236. [Huang Jin, Wang Huijuan, Wang Jiangping, et al. Analysis of ecological restoration technology in abandoned mining area[J]. World Nonferrous Metals, 2019(10): 235- 236.]

[28] 王佳, 田青, 王理德, 等. 民勤青土湖区不同年限退耕地对土壤水分与物种多样性的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 605-614. [Wang Jia, Tian Qing, Wang Lide, et al. Effects of different years of returning farmland on soil moisture and species diversity in Minqin Qingtu Lake area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 605-614.]

[29] 杨海裕, 郑子龙, 刘小林, 等. 基于生态酶化学计量研究小陇山不同植被类型土壤有机碳对微生物磷限制的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 1- 9. [Yang Haiyu, Zheng Zilong, Liu Xiaolin, et al. Effects of soil organic carbon on microbial phosphorus limitation in different vegetation types in Xiaolong Mountain based on ecoenzymatic stoichiometry[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 1-9.]

Syndynamic and diversity of species during gangue treatment in Shuanglong ditch

WANG Lide[1,2,3,4], SONG Dacheng[1,2], LI Guangyu[1,3], ZHAO Heran[1,2], ZHENG Kewen[5]

(1. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Wuwei 733000, Gansu, China; 3. Minqin National Station for Desert Steppe Ecosystem Studies, Mingqin 733300, Gansu, China; 4. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 5. Haxi Town of Tianzhu Tibetan Autonomous County Animal Husbandry and Veterinary Station, Tianzhu 733206, Gansu, China)

Abstract: In order to explore the succession and species diversity of plant communities in the process of gangue treatment, the text used the time-space substitution method to select the different years (2, 5, and 10 a) of gangue treatment in Shuanglong ditch, Tianzhu Tibetan Autonomous County, Gansu Province, and the untreated gangue as the contrast (CK) sample plots . The vegetation was surveyed, and the succession characteristics and species diversity of plant communities were analyzed. The results show that: (1) during the process of Shuanglong ditch gangue treatment, we identified 55 species of plants belonging to 40 genera and 24 families in 4 sample plots. Among these taxa, 15 families were single families, single genus, and single species. There were 28 species of Asteraceae, Poaceae, and Rosaceae, which accounted for 12.5% of the total number of families and 50.91% of the total species. Most of the species belonged to a few families, and most plant species belonged to a single family and a single genus. (2) During the years of gangue treatment, the dominant species of the community gradually changed from annual or perennial herbs to perennial herbs and shrubs. The number of plant species in the CK was 11, and after 5 years of gangue treatment, we identified 28 species, which decreased to 18 species after 10 years of gangue treatment. Finally, *Elymus nutans*, *Poa pratensis*, and *Hippophae rhamnoides* become the dominant species in the sample plot; and these three plants comprised 48.107. (3) With increasing gangue treatment time, the number of species, Shannon diversity index, and Margalef richness index gradually increased from CK to 5 years after gangue treatment, reaching maximum values of 28, 3.506, and 2.877 respectively. The Pielou evenness index changed little, although we observed a trend of "falling-rising-falling." In contrast, the Simpson dominance index showed a trend of "rising-falling-rising," reaching the maximum value of 0.359 after 10 years of gangue treatment. (4) The length of time of gangue treatment greatly impacted the quantitative characteristics of the plant population. Plant height significantly increased from CK, 2−10 a ($P < 0.05$). Coverage significantly increased from CK to 5 a and 10 a of treatment ($P < 0.05$). The number of plants increased significantly from CK to 10 a of treatment ($P < 0.05$). Overall, the results indicate that years of gangue treatment greatly impacted vegetation succession and species diversity in the Shuanglong ditch of the eastern section of Qilian Mountains; and the plant community has gradually become single and stable.

Keywords: Shuanglong ditch; gangue treatment; syndynamic; importance value; diversity of species